МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.793.182 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259

Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения



С. П. Глушко  ✉
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар, Российская Федерация)
✉ sputnik_s7@mail.ru

Введение. Целями работы явились анализ и применение технологии электроискрового нанесения износостойких металлических покрытий на режущие инструменты или детали машин для их упрочнения или восстановления размеров.

Материалы и методы. Рассмотрена технология, устройство и принцип действия модернизированной установки, предназначенных для электроискрового нанесения износостойких металлических покрытий композитами Т15К6, ВК8 и ВК6.

Результаты исследования. Для определения параметров модернизированной установки электроискрового легирования проведены эксперименты по упрочнению твердым сплавом Т15К6 шлифованных образцов из стали 45 размерами 25×25×25 мм. В результате опытов с использованием метода планирования эксперимента подтверждена возможность выбора и регулирования параметров установки. Для упрочнения образцов из стали 45 твердым сплавом Т15К6 выбраны следующие параметры: сила тока I = 1–2 А, напряжение U = 40–75 В, емкость конденсаторной батареи 60–100 мкФ.

Обсуждение и заключение. Применение в качестве защитной среды углекислого газа позволяет увеличить число проходов и, соответственно, число слоев покрытия до двадцати, получать итоговую толщину до 0,3 мм с плотной структурой без оксидов. Покрытия такой толщины дают возможность не только упрочнять, но и восстанавливать размеры изношенных деталей машин. Параметры технологических режимов электроискрового легирования существенно влияют на интенсивность нанесения покрытий и качество получаемой поверхности. Повышение электрических параметров ведет к увеличению интенсивности каждого отдельного разряда и в определенных пределах способствует повышению количества переносимого материала покрытия, а также к более глубоким преобразованиям покрываемой поверхности в зоне разряда. Таким образом, установку электроискрового легирования, оснащенную средствами контроля и диагностики, а также системой подачи защитного газа, можно использовать для упрочнения и восстановления деталей машин и режущих инструментов.

Ключевые слова: электроискровое легирование, детали машин, режущий инструмент, упрочнение, износостойкое покрытие, восстановление деталей.

Для цитирования: Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легированияи упрочнения, С. П. Глушко // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 3. — С. 253–259. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259



Investigation of the electrospark coating, alloying and strengthening technology

S. P. Glushko ✉
Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)
✉ sputnik_s7@mail.ru

Introduction. The work objectives were the analysis and application of the technology of electrospark deposition of wear-resistant metal coatings on cutting tools or machine parts for their hardening or dimensional restoration.
Materials and Methods. The technology, device and principle of operation of the modernized installation intended for electric spark application of wear-resistant metal coatings with composites T15K6, VK8 and VK6 are considered.
Results. To determine the parameters of the upgraded electrospark alloying plant, experiments were carried out on hardening of polished samples made of steel 45 with hard alloy T15K6 with dimensions of 25×25×25 mm. As a result of using the experiment planning method, the possibility of selecting and adjusting the installation parameters was confirmed. The following parameters were selected for hardening samples made of steel 45 with hard alloy T15K6: current I = 1-2–A, voltage U = 40-75 V, capacitor bank capacity = 60–100 μF.
Discussion and Conclusions. The use of carbon dioxide as a protective medium enables to increase the number of passes and, accordingly, the number of coating layers to twenty, to obtain a total thickness of up to 0.3 mm with a dense structure without oxides. Coatings of this thickness make it possible not only to strengthen, but also to restore the dimensions of worn machine parts. The parameters of the technological modes of electrospark alloying significantly affect the intensity of coating application and the quality of the resulting surface. A rise in the electrical parameters causes an increase in the intensity of each individual discharge and, within certain limits, contributes to an increase in the amount of the transferred coating material, as well as to deeper transformations of the coated surface in the discharge zone. Thus, an electrospark alloying plant equipped with monitoring and diagnostic tools, as well as with a protective gas supply system, can be used for hardening and restoring machine parts and cutting tools.

Keywords: electrospark alloying, machine parts, cutting tool, hardening, wear resistance coating, restoration of machine parts.

For citation: S. P. Glushko. Investigation of the electrospark coating, alloying and strengthening technology. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 253–259. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259

Введение. Внедрение технологий изготовления деталей машин и режущих инструментов с высокими механическими характеристиками является важной составляющей машиностроения в целом и производства металлорежущего оборудования в частности. Основными требованиями к этим технологиям являются доступность, экономичность и эффективность.

Материалы, используемые для изготовления деталей машин и режущих инструментов, как правило, не удовлетворяют в полном объеме требованиям эксплуатации, поэтому их надо изготавливать из конструкционных материалов высокого качества. Но в этом случае их производство может оказаться очень дорогим. Кроме того, гарантировать полное удовлетворение эксплуатационных требований в этом случае также невозможно. Эти проблемы в достаточной мере устраняются нанесением на рабочие поверхности деталей машин и инструментов различных по функциональному назначению покрытий толщиной от долей миллиметра до нескольких миллиметров [1–4].

Качество таких покрытий оценивают, как правило, по нескольким частным критериям, на основе которых формируется комплексный критерий. Исследования с применением метода планирования эксперимента [5], в свою очередь, позволяют установить связь критериев качества с параметрами технологического процесса нанесения покрытия [6], оптимизировать эти параметры и прогнозировать свойства биметаллических композиций [7].

Слои покрытий могут иметь различные химические составы и структурно-фазовые состояния, отличающиеся от материала основы. Материалы покрытий обеспечивают высокие эксплуатационные свойства или комплекс свойств рабочим поверхностям режущих инструментов или деталей машин [5, 8–18]. Кроме того, на покрытия, имеющие малую толщину, расходуется незначительное количество дорогостоящих материалов, что дает высокий экономический эффект при их применении в производственной практике.

Используемые в настоящее время различные металлические детали: подшипники, валы, оси, сверла, токарные резцы, фрезы и т. д., требуют повышения их износостойкости и прочности. Одним из недорогих способов нанесения тонких металлических покрытий на их рабочие поверхности является электроискровой метод обработки — электроискровое легирование (ЭИЛ) [1–4]. Кроме того, эту технологию можно использовать для восстановления стальных деталей машин при незначительном износе их рабочих поверхностей — до 0,2 мм.

Материалы и методы. ЭИЛ позволяет выполнять упрочнение режущего инструмента и восстановление стальных деталей машин износостойкими композитами типа Т15К6, ВК8, ВК6 и покрытиями иного состава [8–18]. Эта технология позволяет повысить твердость, износостойкость, коррозионную стойкость металлических поверхностей и обеспечить хорошую связь с материалом основы. ЭИЛ реализуется на относительно простом оборудовании, производительность которого не зависит от твердости и иных физических характеристик используемых материалов.

До настоящего времени предлагались различные модели процесса, которые в той или иной мере объясняли отдельные экспериментальные данные [1–4]. На рис. 1 представлена модель технологии ЭИЛ, которая разработана для высоких напряжений и малых значений тока короткого замыкания ($I_{к.з} < 10–20$ А). В том случае, если ток короткого замыкания $I_{к.з.} > 10$ А и напряжение холостого хода источника питания $U_{х.х} < 50$ В, потребуется уточнение такой модели, так как из-за низкого потенциала между электродами межэлектродный промежуток в этом случае должен быть значительно уменьшен.

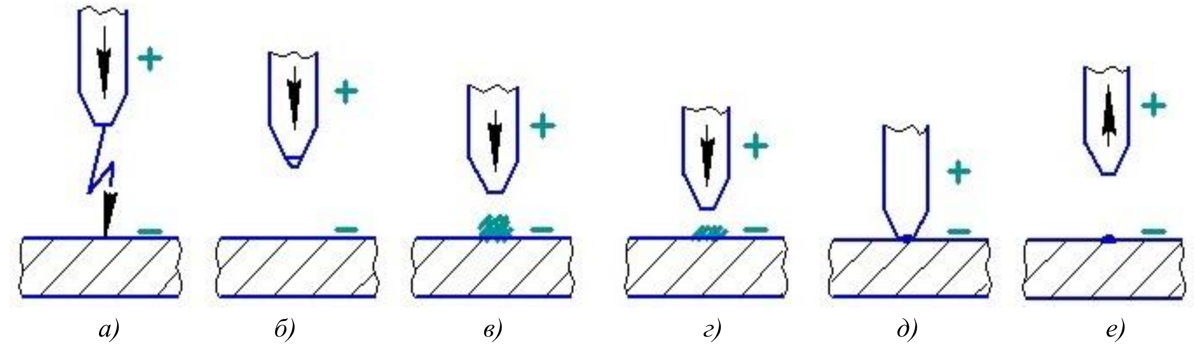


Рис. 1. Модель электроискрового легирования: *а* — момент пробоя межэлектродного промежутка; *б* — отрыв капли расплавленного металла от анода; *в* — взрыв капли расплавленного металла; *г* — осаждение расплавленного металла анода на катоде; *д* — контакт электродов (механический удар анода по катоду); *е* — развод электродов

При приближении подвижного электрода (анода) к катоду (подложке) напряженность электрического поля увеличивается. На определенном расстоянии напряженность достигнет значения, при котором произойдет искровой разряд и будет получен канал сквозной электрической проводимости. Пучок электронов с катода (подложки) пройдет по этому каналу, фокусировано ударит по поверхности анода (рис. 1 *а*) и плотность тока возрастет. Электроны резко освобождают накопленную кинетическую энергию, которая преобразовывается в тепловую, выделяющуюся в поверхностном слое анода. В месте пробоя электрического разряда анод расплавляется, от него отделяется капля расплавленного металла и движется к катоду (рис. 1 *б*), опережая движущийся анод.

Падающая капля, оторвавшись от анода, нагревается до высокой температуры, закипает и взрывается. Цепь тока в канале прерывается, сжимающие силы электромагнитного поля исчезают. Частицы металла, которые образуются после взрыва капли, уже не фокусируются электромагнитным полем и падают на подложку широким фронтом (рис. 1 *в*), а достигнув катода, свариваются с ним, частично внедряясь в его поверхность (рис. 1 *г*).

Вслед за расплавленным металлом электрода движется сам электрод-анод. Тем временем конденсаторная батарея успевает зарядиться, соответственно вырастет напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке. Далее следует механический удар электрода по поверхности подложки, при этом замыкается электрическая цепь.

Материал анода в представленной модели ЭИЛ переносится в жидкокристаллическом состоянии, начиная с момента пробоя межэлектродного промежутка и до соприкосновения анода с поверхностью катода. В жидкокристаллическом состоянии мезофазы вещества характеризуются анизотропными свойствами и сочетают реологические свойства жидких тел (текучесть) со свойствами твердых кристаллов (анизотропия физических свойств). В жидкокристаллическом состоянии текучесть вещества ограничена, так как присутствует определенная упорядоченность расположения и взаимная ориентация его молекул, которая приближается к упорядоченному расположению структуры твердых кристаллов. Через не остывшие, лежащие на катоде частицы материала анода, проходит второй импульс. Импульсные разряды имеют высокую плотность тока — до $10^5–10^6$ А/мм^2.

При механическом контакте подвижного электрода и подложки частицы материала электрода свариваются друг с другом и с поверхностью подложки, которая прогревается, и в нее диффундирует материал электрода. Совместно с диффузионным процессом протекают химические реакции между материалами частиц

электрода и подложки. Механический удар подвижного электрода проковывает нагретый материал покрытия (рис. 1 *д*), повышая его однородность и плотность. Таким образом, на поверхности подложки образуется прочно соединенное с нею покрытие с эффектом легирования (рис. 1 *е*). Затем начинается следующий цикл, и электрод движется вверх.

Процесс нанесения покрытия при ЭИЛ происходит под действием следующих факторов:

- сила тяжести, под действием которой капля расплавленного металла устремляется от анода к катоду, когда они разомкнуты;
- механическая вибрация электродов;
- электрическая полярность, под действием которой ионы материала покрытия оседают на подложке.

Важной характеристикой нанесения покрытий с помощью ЭИЛ является прочность связи покрытия с основой, которая обеспечивает надежную и длительную эксплуатацию режущего инструмента или детали. При формировании покрытия и обеспечении связи покрытия с основой происходит взаимодействие жидких фаз материалов электродов. Между ними образуется химическая связь, развиваются объемные процессы диффузии анода в подложку в твердой фазе, образуются интерметаллиды.

Физико-химические превращения в поверхностном слое подложки протекают при высоких температурах и высокоскоростной пластической деформации. Взаимодействие материалов анода и подложки, кристаллизация расплавленного материала анода на поверхности подложки и диффузия в ее поверхностном слое происходят в неравновесных условиях. Высокие температуры в межэлектродном промежутке и легирующие элементы электрода позволяют наращивать и легировать поверхность подложки, улучшая ее физические и химические свойства. Поэтому ЭИЛ можно использовать для восстановления деталей машин сложной конфигурации и легирования режущего инструмента.

Достоинства ЭИЛ:

- точечный нагрев, при котором отсутствует деформация подложки (основы);
- локальное (точечное) нанесение покрытий, в том числе на подложки со сложной конфигурацией;
- возможность легирования поверхностей деталей машин и режущего инструмента.

Физико-механические свойства поверхности обрабатываемого инструмента или детали можно варьировать, изменяя материал электродов. При этом состав покрытия и его физико-химические свойства могут значительно отличаться от легирующего материала анода, и легируемого материала основы.

Стальная основа после обработки ЭИЛ состоит из трех областей: белого слоя, переходной зоны и основного материала. В тонком белом слое находятся тугоплавкие соединения с мелкозернистой структурой, которая формируются в условиях быстрого теплоотвода. В переходной зоне стальной основы находятся диффузионный слой, зона термического влияния и переходный слой. Диффузионный слой — это мартенситно-карбидная структура. Зона термического влияния представляет собой аустенитно-мартенситно-карбидную структуру. Переходной слой имеет аустенитно-сорбитно-мартенситную структуру. Аустенитная структура образуется на поверхности раздела ферритокарбидных фаз при быстром охлаждении и при диффузионном насыщении стали азотом воздуха если ЭИЛ проводится без использования защитного газа. Следует учитывать, что чем меньше азота проникает в переходную зону, тем больше будет образовываться мартенситной структуры при охлаждении. За переходным слоем следует структура основы, которая не подвергается изменениям. Толщина и структура зон зависят от технологических параметров обработки, состава материалов покрытия и основы, а также от состава окружающей среды.

Производительность процесса ЭИЛ, качество покрытия, величину зерна основы можно регулировать, изменяя скважность и частоту электрических разрядов. Для электродов рекомендуется использовать материалы с высокими показателями твердости и износостойкости, например, карбиды вольфрама и титана, серый или белый чугуны, твердые сплавы на основе карбида титана с различными связками на основе молибдена, никеля, интерметаллидов и стали. Следует учесть, что микротвердость упрочненных слоев, получаемых на закаленных сталях, значительно выше, чем на незакаленных. Это обусловливается активным влиянием материалов основы на формирование покрытия.

Электрические параметры ЭИЛ определяют степень упрочнения, чистоту поверхности покрытия и производительность процесса. Используемые электрические режимы условно можно разделить на грубые, средние и чистовые. Они охватывают значительный диапазон мощности, необходимой для проведения как доводочных, так и грубых процессов ЭИЛ. Грубые режимы характеризуются напряжением 100–200 В и большой емкостью конденсаторной батареи (100–300 мкФ). Средние режимы реализуются путем уменьшения емкости конденсаторной батареи до 90–100 мкФ или снижением напряжения при прежней емкости. Чистовые режимы могут быть получены снижением напряжения до 10–30 В или уменьшением емкости конденсаторной батареи до 0,5–10 мкФ. Соответственно, при этом увеличивается или уменьшается ток короткого замыкания.

К недостаткам технологии ЭИЛ можно отнести ограниченность толщины наносимых слоев покрытий и значительную шероховатость их поверхностей. Рассмотрим недостатки на конкретных примерах.

Пример 1. Установка работает в грубом режиме: емкость конденсаторной батареи С = 200 мкФ, ток короткого замыкания $I_{к.з.}$ = 3 А, напряжение U = 150 В, частота колебаний вибратора с электродом 100 Гц. Допустим, что конденсаторная батарея заряжается до 99 % напряжения источника питания. В этом случае время зарядки конденсаторов составляет 0,05 с. Однако, поскольку вибратор через каждые 0,01 с замыкает электроды и происходит разряд, то напряжение на конденсаторах успевает подняться лишь до 65 В.

Пример 2. Установка работает в мягком режиме: емкость конденсаторной батареи С = 4 мкФ, ток короткого замыкания $I_{к.з.}$ = 0,5 А, напряжение U = 150 В, конденсаторы заряжаются до 99 % напряжения источника питания. В этом случае время зарядки конденсатора составляет 0,005 с, но вибратор будет замыкать электроды только через 0,01 с. В этом случае процесс простаивает в ожидании очередного замыкания электродов около 50 % времени.

Одной из основных причин ограниченности толщины слоя покрытия является возникновение химических реакций между материалом электрода и окружающей его средой в процессе легирования. Экспериментальные данные показали: чем больше инертность окружающей среды, тем выше допустимая удельная продолжительность легирования и тем больше материала покрытия можно нанести на катод. Однако и в инертных средах с увеличением продолжительности легирования наблюдается уменьшение количества материала, осаждающегося на катоде.

Применение вакуума для устранения влияния химических элементов защитной среды на состав покрытия потребует значительного усложнения и удорожания установок электроискрового легирования. Поэтому применение защитной среды, например, углекислого газа для ЭИЛ является предпочтительным.

Для исследования технологии ЭИЛ применялась модернизированная установка ЭФИ-25 (рис. 2). Основу ее силовой части составляет однофазный трансформатор с повышенным рассеянием, селеновый выпрямитель и батарея конденсаторов. Первичная обмотка трансформатора питается от однофазной сети переменного тока промышленной частоты с напряжением 220 В через предохранитель на 5 А и двухполюсный выключатель. Выпрямитель установки двухполупериодный. Катод (обрабатываемая деталь) заземлен.

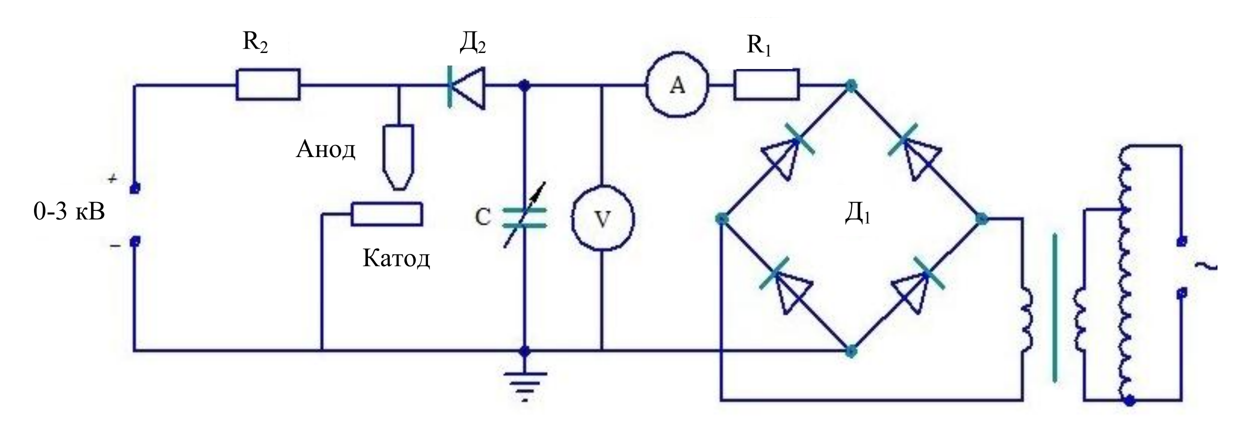


Рис. 2. Электрическая схема питания межэлектродного промежутка установки электроискрового легирования: $Д_1$ — селеновый выпрямитель; С — батарея конденсаторов; R_1 — балластное сопротивление; R_2 — токоограничительное сопротивление; $Д_2$ — вентили; А — амперметр; V — вольтметр

На выходе выпрямителя напряжение меняется от 15 до 220 В путем переключения вторичной обмотки. Вентили разделяют низковольтную и высоковольтную части установки, что препятствует пробою высокого напряжения в RC-генератор, который предназначен для получения искрового разряда. Генератор вырабатывает импульсы тока в диапазоне частот 100–600 Гц. Это оптимальные частоты, которые определены в ходе экспериментов с разными материалами. Работа установки ЭИЛ вне этого диапазона приводит к ухудшению показателей технологического процесса.

Автоматизация процесса ЭИЛ и постоянный контроль его параметров позволяют обеспечить высокую производительность и получить качественное твердосплавное покрытие. Это обеспечивают, в частности, амперметр А, предназначенный для контроля тока в цепи питания межэлектродного зазора, и вольтметр V — для контроля напряжения в цепи питания межэлектродного зазора (рис. 2).

На модернизированной установке в качестве источника питания установлен автотрансформатор, что позволяет бесступенчато регулировать напряжение на межэлектродном промежутке до 200 В. Установлена панель переключателей емкости конденсаторной батареи для ступенчатого изменения емкости источника

питания межэлектродного разряда. Суммарная емкость конденсаторной батареи — 120 мкФ, число ступеней переключений — 16.

Безопасность работы на установке обеспечивается разделительным трансформатором с коэффициентом трансформации К = 1:1 между трансформатором и электродами установки. Технологические режимы работы установок ЭИЛ для нанесения покрытий, легирования и упрочнения, в основном, задают следующие параметры:

- напряжение на межэлектродном промежутке;
- емкость конденсаторной батареи;
- зарядный ток или процент зарядки конденсаторов от напряжения цепи.

Результаты исследования. Чтобы определить возможность регулирования параметров ЭИЛ, которые должны обеспечиваться модернизированной установкой, проведены эксперименты по электроискровому упрочнению твердым сплавом Т15К6 шлифованных образцов из стали 45 с размерами 25×25×25 мм. Эксперименты проводились без использования защитного газа в зоне нанесения покрытия и с использованием углекислого газа в качестве защитной среды. В результате подтверждена возможность выбора и регулирования параметров ЭИЛ. В частности, для упомянутого процесса выбраны следующие параметры электроискровой установки: сила тока I = 1–2 А, напряжение U = 40–75 В, емкость конденсаторной батареи 60–100 мкФ.

Результаты опытов без применения углекислого газа показали: при нанесении твердого сплава на поверхность стали 45 при минимальном напряжении и минимальной силе тока поверхность материала упрочняется неравномерно из-за прилипания электрода к обрабатываемой поверхности; минимальное напряжение ведет к резкому увеличению пористости наносимого покрытия; толщина нанесенного слоя мала и не превышает 0,1 мм. Поверхность неровная, рыхлая, со следами оксидов, причем, число произвольных проходов легирующего электрода, т. е. проходов, при которых происходит увеличение толщины упрочненного слоя, не превышает восьми. Связано это с ростом термических напряжений, обусловленных локальными перепадами температур на границе плакирующий слой — основа и преимущественно адгезионным характером связи плакирующего сдоя с основой. Кроме того, твердость плакирующего слоя ниже твердости электрода. Например, использованные в экспериментах пластины из твердого сплава Т15К6 имели твердость 85–90 HRC, а в плакирующем слое этот материал имеет твердость 80–85 HRC.

В следующей серии опытов для предотвращения окисления в зону нанесения покрытия подавался углекислый газ. Это позволило при тех же электрических параметрах увеличить число проходов, соответственно число наносимых слоев покрытия, до двадцати и получать итоговую толщину покрытия до 0,3 мм с плотной структурой и без оксидов. Получение покрытия такой толщины дает возможность не только упрочнять, но и восстанавливать размеры изношенных деталей машин.

Обсуждение и заключения. Повысить эксплуатационные характеристики деталей машин и режущих инструментов без ущерба для экономических показателей возможно с помощью нанесения на их рабочие поверхности покрытий методом ЭИЛ. Рассматриваемая технология за счет точечного нагрева, при котором отсутствует деформация подложки (основы), и локального нанесением покрытий позволяет восстанавливать размеры деталей сложной конфигурации, утраченные в результате изнашивания. Это возможно за счет применения для ЭИЛ защитной среды в виде углекислого газа, т. к. позволяет увеличить толщину покрытия до 0,3 мм и добиться его плотной структуры, не имеющей оксидов.

Значения параметров электроискрового легирования существенно влияют на интенсивность нанесения покрытий и качество получаемой поверхности. Повышение электрических параметров ведет к увеличению интенсивности каждого отдельного электрического разряда и, в определенных пределах, способствует повышению количества переносимого материала покрытия и более глубоким преобразованиям в покрываемой поверхности (в зоне разряда).

Таким образом, установку электроискрового легирования, оснащенную средствами контроля и диагностики, а также системой подачи защитного газа, можно использовать для упрочнения и восстановления деталей машин и режущих инструментов.

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова. — Москва : Изд-во МГТУ Станкин, 2007. — 324 с.

2. Прогрессивные технологии нанесения покрытий / С. В. Авдейчик, А. С. Воронцов, В. М. Давыдов [и др.]. — Москва : Спектр, 2012. — 272 с.

3. Коротаев, Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д. Н. Коротаев. — Омск : Изд-во СибАДИ, 2009. — 256 с.

4. Выскоэнергетическое локальное воздействие на вольфрамсодержащие материалы и металлы / А. Д. Верхотуров, П. С. Гордиенко, В. А. Достовалов [и др.]. — Владивосток : Издат. дом Дальневост. федер. ун-та, 2012. — 472 с.

5. Макаричев, Ю. А. Методы планирование эксперимента и обработки данных / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. — Самара : Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2016. — 131 с.

6. Глушко, С. П. Синтез критерия качества биметаллических подшипников скольжения / С. П. Глушко, С. Г. Денисенко // Конструкционная прочность, долговечность, упрочнение материалов и деталей машин : Тез. докл. всесоюз. науч. конф. — Волгоград : Дом науки и техники, 1990. — С. 202–204.

7. Денисенко, С. Г. Оптимизация технологии производства подшипников скольжения из биметалла сталь-бронза / С. Г. Денисенко, С. П. Глушко // Современные методы наплавки, упрочняющие покрытия и используемые материалы : Тез. докл. IV Укр. респ. науч.-тех. конф. — Харьков : Изд-во ХАДИ, 1990. — С. 70–71.

8. Николенко, С. В. Новые электродные материалы для электроискрового легирования / С. В. Николенко. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 219 с.

9. Николенко, С. В. Синтез материалов на основе боридов вольфрама и циркония в режиме горения / С. В. Николенко, В. В. Гостищев, Н. В. Лебухова // Вопросы материаловедения. — 2011. — № 4. — С. 89–94.

10. Наноструктурирование поверхностности стали электроискровой обработкой новыми электродными материалами на основе карбида вольфрама / С. В. Николенко, А. П. Кузьменко, Д. И. Тимаков, П. В. Абакумов // Электронная обработка материалов. — 2011. — № 47. — С. 28–35.

11. Zheng Chen. Surface modification of resistance welding electrode by electro-spark deposited composite coatings: Part I. Coating characterization / Zheng Chen, Yixiang Zhou // Surface & Coatings Technology. — 2006. — Vol. 201 (3). — P. 1503–1510. 10.1016/j.surfcoat.2006.02.015

12. Jun Liu. The formation of a single-pulse electrospark deposition spot / Jun Liu, Ruijun Wang, Yiyu Qian // Surface & Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200 (7). — P. 2433–2437. 10.1016/j.surfcoat.2004.07.104

13. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC–Co electrodes: Deposition process, structure, and properties / E. I. Zamulaeva, E. A. Levashov, A. E. Kudryashov [et al.] // Surface & Coatings Technology. — 2008. — Vol. 202. P. 3715–3722. 10.1016/j.surfcoat.2008.01.008

14. Electrospark alloying for deposition on aluminum surface of Al-Sn coatings and their wear resistance under dry friction / V. I. Agafii, V. I. Petrenko, V. M. Fomichev [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2013. — Vol. 49 (3). — P. 1–8. 10.3103/S1068375513030022

15. Ribalko, A. V. A modified electrospark alloying method for low surface roughness / Alexander V. Ribalko, Orhan Sahin, Kemal Korkmaz // Surface & Coatings Technology. — 2009. — Vol. 203 (23). — P. 3509–3515. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.05.002

16. Use of the electrospark alloying method to increase the corrosion resistance of a titanium surface / L. P. Kornienko, G. P. Chernova, V. V. Mihailov, A. E. Gitlevich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2011. — Vol. 47 (1). — P. 9–17.

17. Tribological properties of electrospark-deposited and further laser-hardened coatings / E. Feldshtein, M. A. Kardapolova, R. Gaida, B. Khorodyski // Journal of Friction and Wear. — 2013. Vol. 34 (2). — P. 137–141. 10.3103/S1068366613020049

18. Topala, P. Nanostructures obtained using electric discharges at atmospheric pressure / Pavel Topala, Alexandr Ojegov, Veaceslav Ursaki // In: Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications. Springer, 2016. — P. 43–83.

Поступила в редакцию 19.07.2021
Поступила после рецензирования 02.08.2021
Принята к публикации 03.08.2021

Об авторе:

Глушко Сергей Петрович, доцент кафедры «Системы управления и технологические комплексы», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (350072, РФ, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2 А), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7087-6572, sputnik_s7@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.